

食品凝胶特性及其在口腔加工中的应用

张奋楠¹, 俞经虎^{1,2*}

(¹ 江南大学机械工程学院 江苏无锡 214122

² 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室 江苏无锡 214122)

摘要 近年来,由于缺乏食品质地与口腔加工能力相关性的研究数据,制约了与老年人群体口腔加工能力相匹配、口感优良的食品的研发,这引发了人们对软材料,特别是食品凝胶断裂行为的研究兴趣。通过分析复配凝胶完整的应力-应变曲线变化规律,探究断裂应力、断裂应变、杨氏模量与特定的可感知的质构特性间的关系,建立质构特性与压缩参数间的回归方程模型;基于仿生咀嚼平台的食品凝胶咀嚼试验研究,分析咀嚼后食团的碎片数量与最大咀嚼力,并建立该情况下凝胶的黏弹性本构模型。研究结果表明:断裂应力、断裂应变对食品凝胶破裂行为的影响较大,断裂应力、断裂应变值较低的凝胶更容易分解成大量碎片,特定的压缩参数对凝胶质构参数影响显著。本研究结果对开发老年人群的凝胶食品材料具有重要意义。

关键词 食品凝胶; 本构模型; 力学性能; 质构参数; 仿生咀嚼平台

文章编号 1009-7848(2022)10-0087-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.10.010

使用添加果汁、香料等的人造食品凝胶制作的糖果食品,越来越受到消费者的欢迎。这些凝胶具有特殊的优势,如咀嚼质地较软、口感多汁、容易融化的特性以及相关的感官特性,使产品在消费者中广受欢迎^[1]。然而,所开发产品质地是一个关键属性,需根据消费者的喜好进行调整,可能需要准确地选择胶体和食品添加剂。琼脂和明胶等亲水胶体在开发食品凝胶方面具有许多优势。这些亲水胶体的溶胶在冷却时能够形成一种凝固良好的热可逆凝胶^[2]。琼脂的特殊优势是成本低,即使含量低至 0.04% 也具有良好的胶凝作用^[3],而明胶的透明性好,便于着色。凝胶的质地和浓度是凝胶形成的重要因素。然而,凝胶样品可能对应变率和压缩速度的变化较敏感^[4]。虽然对一些食品,如面包^[5]、休闲零食等的应变率依赖性的研究已有报道,但是对于食品凝胶的研究却很少。此外,除了根据应变硬化/软化现象确定应力-应变关系外,还应探究食品凝胶的重要结构参数,如杨氏模量等。采用四原件力学模型拟合应力松弛曲线,在单

轴压缩试验下,探究压缩速率对断裂应力和破裂应变变化的影响^[6],这类研究的重要性在于了解凝胶在不同速率下的力学性能(模拟食品在人类口腔内的变化)。Yu 等^[7]利用 Ogden 模型成功地描述了琼脂凝胶在不同应变率下的应力应变行为,更好地表征了食品凝胶在压缩过程中的黏弹性。

食品材料,包括人造食品凝胶,在发生微小或较大变形时,会产生用于不同研究目的的数据。然而,产品的感官特性更多地与大变形相关;断裂/失效行为只能通过大变形试验来确定,这些研究结果对即食凝胶产品的研发至关重要。在不同的应变速率下进行大变形压缩试验,是描述凝胶食品详细结构特性的有效方法。Marco 等^[8]通过改变不同凝胶溶液(琼脂、*k*-卡拉胶、明胶)的浓度,来改变断裂应力和应变,结果发现在口腔加工过程中,明胶凝胶比琼脂凝胶和 *k*-卡拉胶凝胶具有更高的异质性强度。目前,研究报道大多将不同凝胶的结构性质与物理性质相结合,或从生物学角度,根据凝胶在体内和体外咀嚼后的食团的粒径分布情况,丸状食品物性和生化作用对凝胶崩解和胃排空模式的作用^[9],或者研究不同影响因素,如 pH、还原糖、水分含量等,对凝胶分子网络形成、多种凝胶协同作用的影响,进而探究凝胶的理化性质^[10-12],而对于机械性能与质构特征相联系的研究报道很少。许多老年人由于牙齿缺失、咬合力下

收稿日期: 2021-10-05

基金项目: 江苏省先进食品制造装备与技术重点实验室重点项目(FMZ201901, FMZ201907); 国家自然科学基金项目(51775244)

作者简介: 张奋楠(1996—),女,硕士生

通信作者: 俞经虎 E-mail: jnjxjinhuyu@163.com

降、唾液分泌量减少等因素导致在食品口腔加工能力方面的能力有所下降,口腔进食过程变得困难^[13]。而目前食品行业针对食品的设计与制造由于缺少食品口腔加工能力的等级标准和评估方法,缺少食品机械性能与口腔加工能力、食品质构特性相关性的基础数据,制约了像老年人这样特定人群的食品选择。因为各类特殊消费人群的数量逐渐增加,对开发与其口腔加工能力相匹配的并具有优良口感的特殊功能食品的需求快速扩张^[14]。Lavergne等^[15]通过乳化凝胶对口腔加工过程进行研究,发现其动态质构特性与口腔加工过程中食品断裂性能高度相关。因此,建立质构特性与压缩试验参数间的回归模型,对使用机械性能参数去预测质构参数、开发特定食品具有重要指导意义。

本文拟采用TPA(Texture profile analysis)进行压缩试验和应力松弛试验,研究在不同压缩速率下,不同质量浓度的明胶及明胶和琼脂组合作为模型体系的食品凝胶的压缩特性,通过分析应变应力曲线,建立回归方程,探究食品凝胶的力学性能(如断裂应变、断裂应力、杨氏模量)与特定的可感知的质构特性之间的关系;基于本实验团队研发的仿生咀嚼平台^[16-17]进行食品凝胶口腔加工试验,最终建立特定食品凝胶力学本构模型,以期开发特殊人群(老年人等)的特定食品提

供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

明胶(冻力 250 g),河北鑫达生物科技有限公司;琼脂粉(凝胶强度 1000 g),福建省绿麟食品胶体有限公司。

物性分析质构仪(机型:TMS-PRO,美国FTC;由主机、软件、力量感应元和实验探头等主要部件组成);实验室自制仿生咀嚼平台^[15-16];圆盘电子天平(300 g/0.01g),宜兴乐祺纺织集团有限公司。

1.2 试验样品的制备

分别配制质量浓度为 50,70,90 g/L 的明胶溶液及其复配溶液(在不同质量浓度的明胶溶液中,分别加入质量浓度为 6,12,24,48 g/L 的琼脂)。取适量食用明胶或食用明胶及琼脂粉末复配溶液,于烧杯中冷水浸泡 1.5 h 后,在磁力搅拌器上搅拌 15 min,然后在水浴锅中加热至完全溶解,95 °C 下恒温 25 min,取出后立即倒入硅胶模具中(制成直径 40 mm,高度 20 mm 的样品),放入 5 °C 恒温箱恒温中保存 12 h。所有凝胶制备过程均重复 2 次。不同质量浓度组成的凝胶编号如表 1 所示,形式分别为 S_{ij} 、 S'_{ij} 。

表 1 不同质量浓度明胶及明胶、琼脂复配凝胶编号

Table 1 The numbers of gelatin and gelatin-agar gels at different mass concentration

质量浓度	0 g/L 琼脂	6 g/L 琼脂	12 g/L 琼脂	24 g/L 琼脂	48 g/L 琼脂
50 g/L 明胶	S_{10}/S'_{10}	S_{11}/S'_{11}	S_{12}/S'_{12}	S_{13}/S'_{13}	S_{14}/S'_{14}
70 g/L 明胶	S_{20}/S'_{20}	S_{21}/S'_{21}	S_{22}/S'_{22}	S_{23}/S'_{23}	S_{24}/S'_{24}
90 g/L 明胶	S_{30}/S'_{30}	S_{31}/S'_{31}	S_{32}/S'_{32}	S_{33}/S'_{33}	S_{34}/S'_{34}

1.3 质构测定方法

1) 单轴压缩试验 使用直径 75 mm 的圆盘挤压探头(探头表面积需大于样品表面积,以保持真正的压缩力),质构仪在速度较小时,测试的精度比较高,故设定 0.1,1 mm/s 的压缩速度,对凝胶样品(直径 40 mm,高度 20 mm)单轴压缩 50% 形变量。在圆盘挤压探头与凝胶待测样品接触的地方涂擦硅油,防止凝胶样品与探头粘连并且在最大程度上减小摩擦力对试验的影响。

2) 应力松弛试验 使用直径 75 mm 的圆盘挤压探头,检测速度为 1 mm/s,固定应变 0.5,应力松弛时间 360 s。平行板间圆柱试样的压缩特性可以分别用真压缩应变(ε_T)和真应力(σ_T)表示,见式(1)和式(2)。

$$\varepsilon_T = \ln \left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta h} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_T = \frac{F}{A_0} \frac{(H_0 - \Delta h)}{H_0} \quad (2)$$

式(1)~(2)中, F ——压缩力(N); H_0 ——样品的初始高度(mm); Δh ——由于压缩而引起的高度变化(mm); A_0 ——样品的初始横截面积(mm^2),通常使用圆柱样品,即有 $A_0=\pi r_0^2$; r_0 ——样品的初始半径(mm)。

线弹性极限内真应力和真应变曲线的斜率是杨氏模量,这是表征材料特性的一个重要参数。根据公式(1)和(2),结合压缩试验中采集的压缩力以及压缩量可以计算得到明胶、琼脂复配凝胶在压缩过程中的真压缩应力与真压缩应变。

1.4 仿生咀嚼平台口腔加工试验

使用本实验团队开发的仿生咀嚼机器人进行凝胶口腔崩解实验,该咀嚼平台是根据人类口腔数据设计和开发的,可以再现人类下颌咀嚼运动,目的是通过模拟口腔环境和咀嚼运动,生成与人类咀嚼产生的性质相似的食物团,从而为与食品口腔加工和食物团等相关的多种研究提供实验平台。本文将咀嚼次数设置为主要研究对象,设置 4 水平(3,6,12,15 次)自变量,其它咀嚼参数设置为常量,平均咀嚼速度为 1 mm/s,咀嚼应变 100% (100%为食品的总高度,上下牙齿在咬合运动完成时接触),唾液输送量为 2 mL,口腔温度 28 °C,所用牙齿为第一磨牙和第二磨牙。

1.5 数据统计与分析

试验数据采用 Origin 2019, IBM SPSS Statistics 26 软件进行处理分析;结果显示为“平均值±标准差”,分别采用单因素方差分析(Tukey 均值比较和 Levene 方差齐次检验;事后多重比较)分析数据的显著性(显著性水平为 0.05)。

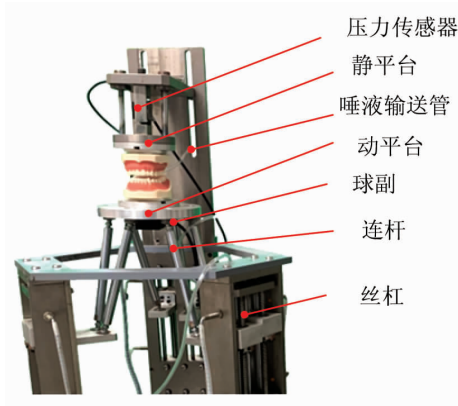


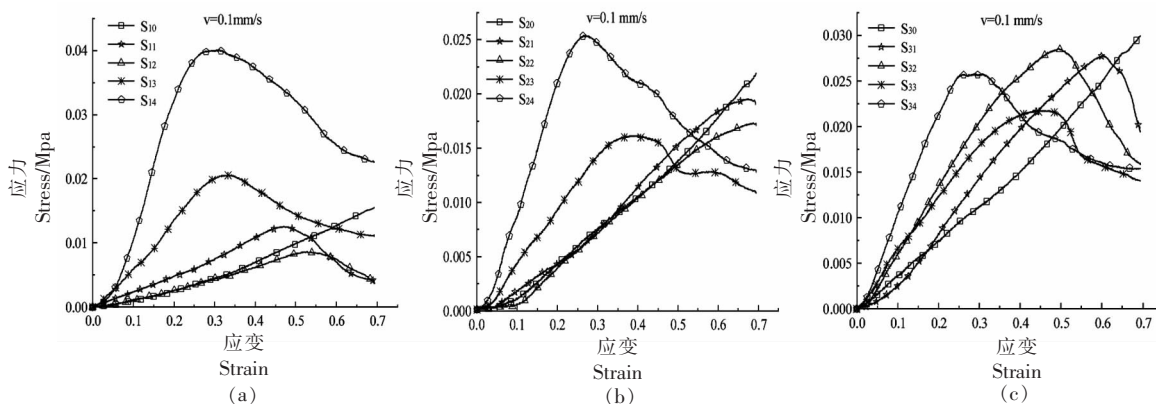
图 1 仿生咀嚼平台

Fig.1 Bionic chewing platform

2 结果与分析

2.1 凝胶样品应力-应变图

明胶及其与琼脂的复配凝胶按不同质量浓度的琼脂进行单轴压缩,确定其结构属性,包括断裂特征和不透明性^[18]。图 2 为不同质量浓度明胶和不同质量浓度复配凝胶,分别在 0.1 mm/s 和 1 mm/s 压缩速度下,进行压缩试验后得到的应力应变曲线。在所有样品的压缩区中,当应变区域为 0.5~2.5 时,琼脂质量浓度为 48 g/L 的复配凝胶的应力值最高,这表明在复配凝胶体系中,质量浓度为 48 g/L 的凝胶是一种相对较硬的凝胶(硬度值如图 3 所示),具有较低的韧性特征。凝胶这种黏弹性物质在压缩作用下会松弛,而提升琼脂质量浓度会降低凝胶的高度松弛,故随着琼脂质量浓度的增加,凝胶的弹性值逐渐下降(弹性值如图 3 所示),这对于制作能够快速咀嚼的食品具有可取性。此外,当应变值为 0.3 以内时,并没有观察到明胶凝胶破裂成多块状,相反的是,当应变逐渐增



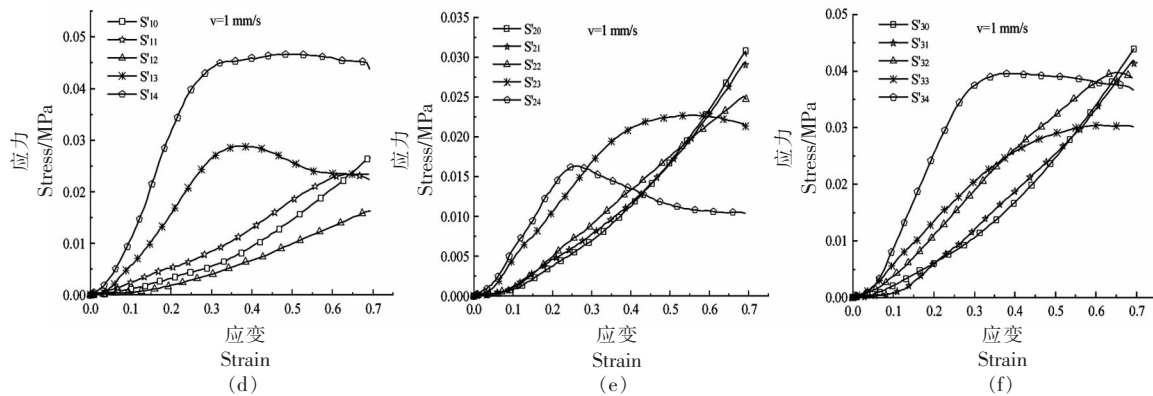


图2 压缩速率分别为0.1,1 mm/s的不同质量浓度凝胶应变应力图

Fig.2 Different mass concentrations of gels' strain-stress diagram were obtained at different compression rates of 0.1, 1 mm/s

加,细小或大裂纹通常也只是由凝胶中心扩展;而复配凝胶多以块状破裂,且当压缩速度为0.1 mm/s、琼脂质量浓度增加至24 g/L和48 g/L时,凝胶的破裂程度最高。这些结果表明,明胶凝胶只有在高应变水平下才表现出断裂,咀嚼度高(图3);而复配凝胶比明胶凝胶样品更脆,咀嚼度虽随着琼脂质量浓度的增加而增加(图3),但咀嚼度值均低于明胶凝胶,表现出适中性。

2.2 杨氏模量

评价食品凝胶的压缩特性还有杨氏模量,由图2的应力-应变曲线的线弹性阶段确定,使用线性回归将曲线近似到0.3的应变水平,结果如表2所示。当压缩速度由0.1 mm/s增加到1 mm/s时,所有样品凝胶的杨氏模量均增大;且随着琼脂含量的增加,凝胶样品杨氏模量呈先增加再减小然后再增加的趋势,且琼脂质量浓度为24 g/L和48 g/L时,杨氏模量的增加量较大,杨氏模量值也较高。

表2 不同压缩速度下的不同质量浓度的凝胶杨氏模量值(kPa)

Table 2 The Young's modulus of gel with different mass concentrations at different compression speed (kPa)

琼脂质量浓度/ g·L ⁻¹	50 g/L 明胶		70 g/L 明胶		90 g/L 明胶	
	0.1 mm/s	1 mm/s	0.1 mm/s	1 mm/s	0.1 mm/s	1 mm/s
0	25.71 ± 3.75	25.77 ± 0.42	42.24 ± 11.01	30.36 ± 0.47	34.61 ± 0.95	40.21 ± 0.61
6	25.84 ± 1.41	36.76 ± 7.36	43.36 ± 2.02	61.64 ± 0.36	65.60 ± 2.63	64.52 ± 0.52
12	15.56 ± 6.96	18.32 ± 3.60	41.42 ± 0.25	52.17 ± 0.57	77.40 ± 12.36	79.26 ± 9.57
24	61.84 ± 7.56	118.00 ± 0.78	60.71 ± 0.10	81.11 ± 12.40	62.23 ± 2.37	68.21 ± 4.33
48	171.50 ± 1.58	240.00 ± 0.19	100.08 ± 1.35	103.45 ± 17.24	116.31 ± 11.97	160.60 ± 0.65

2.3 质构特性

由图3可知,明胶凝胶的硬度值随着质量浓度的增加而升高,这是因为明胶质量浓度越大,其凝胶网络结构越致密^[9],因此所需要施加的破坏应力越大;在复配凝胶体系中,随着琼脂含量的增加,硬度值升高,咀嚼度略有上升,弹性值有所下降。

2.4 质构特性与压缩试验参数间的回归分析

由表4可知,质构参数(Y_i)服从正态分布,可进行步进回归分析。取最优模型分别有以下回归

结果,见表5。

断裂应力、压缩速度均与硬度和咀嚼度呈正相关,杨氏模量与硬度呈负相关,硬度相关系数绝对值大小依次为断裂应力(0.778)>琼脂浓度(0.615)>断裂应变(0.283)>杨氏模量(0.273)>压缩速度(0.238),断裂应变、杨氏模量与咀嚼度呈负相关,咀嚼度相关系数绝对值大小依次为杨氏模量(0.744)>断裂应力(0.676)>压缩速度(0.503)>琼脂浓度(0.417)>断裂应变(0.075);断裂应变、压缩速度、琼脂浓度与弹性呈负相关,断裂应力与

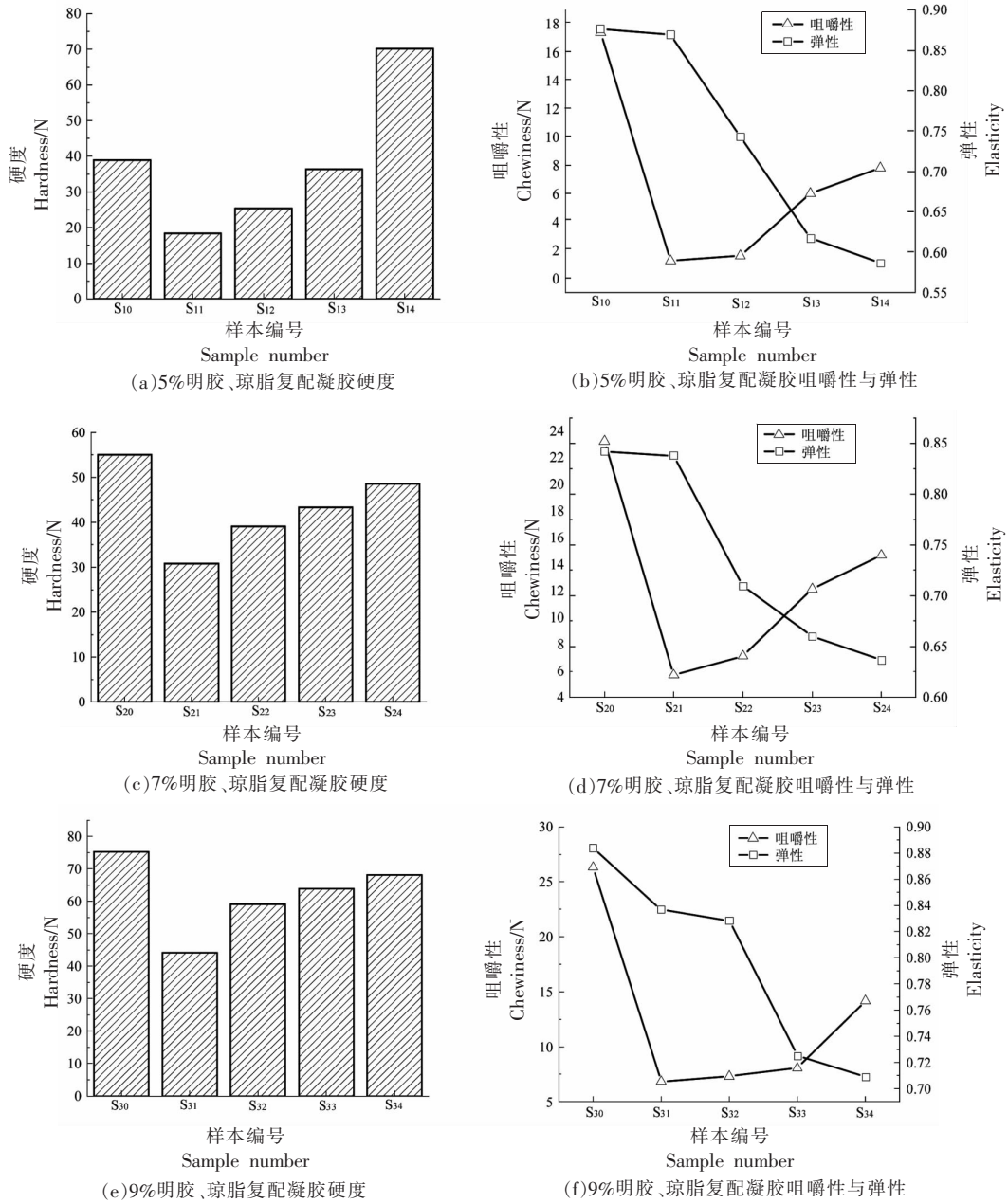


图 3 不同质量浓度的凝胶质构特性

Fig.3 Texture properties of gel with different mass concentrations

表 3 质构特性与压缩参数间相关性分析

Table 3 Correlation analysis between texture characteristics and compression parameters

指标	断裂应力/ kPa	断裂应变	杨氏模量/ kPa	压缩速度/ mm·s ⁻¹	琼脂浓度/ g·mL ⁻¹	硬度/N	咀嚼度/N	弹性
断裂应力	1							
断裂应变	0.007	1						
杨氏模量	0.562	-0.696**	1					
压缩速度	0.459*	0.209	0.159	1				

(续表 3)

指标	断裂应力/ kPa	断裂应变	杨氏模量/ kPa	压缩速度/ mm·s ⁻¹	琼脂浓度/ g·mL ⁻¹	硬度/N	咀嚼度/N	弹性
琼脂浓度	0.171	-0.893**	0.819**	0.000	1			
硬度	0.842**	-0.025	0.513**	0.611**	0.277	1		
咀嚼度	0.559**	0.180	0.110	0.679**	-0.009	0.000	1	
弹性	0.009	0.475**	-0.489**	-0.003	-0.552**	0.111	0.380*	1

注:* 和 ** 分别表示 $P<0.05$ 水平显著相关和 $P<0.01$ 水平极显著相关。

表 4 正态性检验输出结果

Table 4 Output results of normality test

因变量	柯尔莫戈洛夫-斯米诺夫			夏皮洛-威尔克		
	统计	自由度	Sig.	统计	自由度	Sig.
硬度	0.222	6	0.200*	0.965	6	0.854
咀嚼度	0.225	6	0.200*	0.888	6	0.306
弹性	0.188	6	0.200*	0.935	6	0.617

表 5 质构特性与压缩参数的回归方程

Table 5 Regression equation of texture characteristics and compression parameters

质构参数 Y_i	断裂应力 (X_1)	断裂应变 (X_2)	杨氏模量 (X_3)	压缩速度 (X_4)	琼脂质量浓度 (X_5)
硬度 Y_1	$Y_1 = -30.029 + 0.778X_1 + 0.283X_2 - 0.273X_3 + 0.238X_4 + 0.615X_5$				
咀嚼度 Y_2	$Y_2 = -9.078 + 0.676X_1 - 0.075X_2 - 0.744X_3 + 0.503X_4 + 0.417X_5$				
弹性 Y_3	$Y_3 = 0.867 + 0.458X_1 - 0.286X_2 - 0.645X_3 - 0.051X_4 - 0.358X_5$				

弹性呈正相关, 相关系数绝对值大小为杨氏模量(0.645)>断裂应力(0.458)>琼脂浓度(0.358)>断裂应力(0.286)>压缩速度(0.051)。通过分析结果可以看出, 对咀嚼度和弹性的影响主要是材料本身的特性(杨氏模量), 以及通过影响施加的应力水平作用而产生, 其次是压缩样本的速度。而压缩样本的速度对于硬度和弹性, 尤其是弹性值的影响较小。这对探究口腔加工中咀嚼力和咀嚼速度对咀嚼效率、口感评估的影响有间接促进作用。

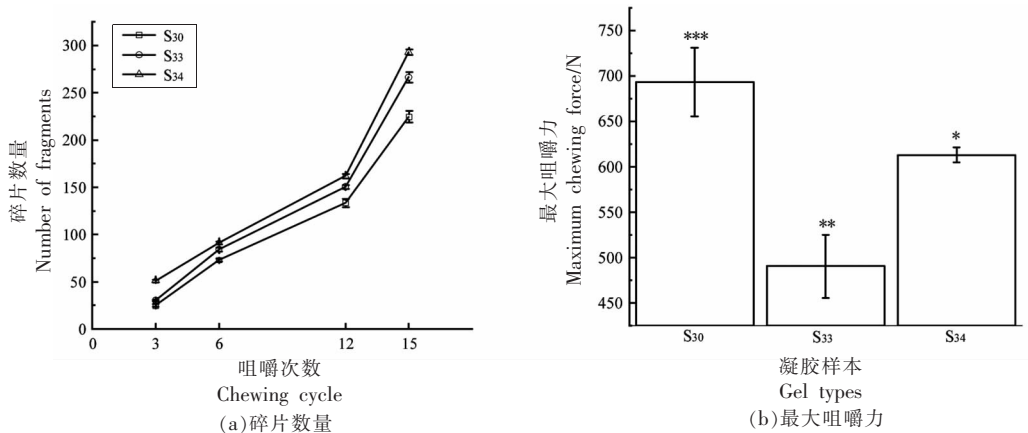
2.5 食品凝胶在口腔加工中的崩解行为

食品口腔加工是一个食品被破坏、质地被感知的复杂动态过程, 口腔加工能力和食品质地感知, 都与食品在口腔加工中的变形紧密相关^[20]。图 4 显示了经仿生咀嚼平台咀嚼加工后食团形成的碎片数量(图 4a)和咀嚼时采集到的最大咀嚼力(图 4b)。随着咀嚼次数的增加, 碎片数量增加, 在相同咀嚼条件下, 琼脂浓度越高, 咀嚼后形成的碎片数量越多; 添加琼脂后的食品凝胶在咀嚼时, 最大咀嚼力均低于明胶凝胶, 这与图 3c 硬度值所表

示的情况对应。结合表 5 质构特性与咀嚼参数间的回归分析可得, 断裂应力、咀嚼速度、断裂应变均影响硬度和咀嚼度, 高、低应变之间凝胶碎片数量与最大咀嚼力之间存在显著性差异, 断裂应力和断裂应变对口腔加工凝胶的破坏行为有影响。因此, 在食品开发方面, 明胶凝胶可用于制备咀嚼多汁的食品, 该类食品在口腔中停留的时间较长, 不易崩解; 明胶、琼脂复配凝胶则可以开发易碎型食品, 且琼脂含量越高, 崩解程度越高, 该类食品在口腔中容易破碎, 适用于口腔加工能力较低的老年人。

2.6 食品凝胶力学本构模型分析

材料的受力特征和其内部结构的变化可用广义时间这一基本量来表示, 材料的应力状态取决于变形和温度对广义时间的泛函^[21]。借鉴经典食品物性学所提出的食品本构模型建立法则, 针对黏弹性食品-凝胶, 以基于质构仪展开的应力松弛实验为方法, 揭示凝胶食品材料在受载过程中的力学行为与形变特征, 构建黏弹性食品本构模型。



注: *、**、*** 表示数据间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 经仿生咀嚼平台咀嚼 3,6,12,15 次后食品凝胶碎块数及最大咀嚼力

Fig.4 Number of fragments and maximum chewing force produced by bionic chewing platform after 3, 6, 12 and 15 chewing cycles

而黏弹性材料应力时间曲线表现为应力随时间延长而呈现指数型衰减的趋势,故采用弹簧黏壶组合模型^[22],它由多个 Maxwell 单元并联而成,每个 Maxwell 模型中的模量 E_i 及黏壶黏度 η_i 均不相同,即广义时间 $\tau_i = \eta_i / E_i$ 也均不相同,采用 3 个 Maxwell 单元,建立其本构方程为:

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon + E_1 \varepsilon \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} + E_2 \varepsilon \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} + E_3 \varepsilon \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}} \quad (3)$$

采用如图 5 所示的本构模型对质量浓度为 90 g/L 明胶系列不同琼脂质量浓度凝胶样品的应力松弛曲线进行拟合,模型方程见公式(3)。利用 Origin 2019 作拟合分析,获得的松弛阶段拟合方程的模型参数如表 6 所示。所有校正系数 R^2 拟合度均大于 0.98,这表明所采用的方程拟合精度很高。其中,琼脂质量浓度为 48 g/L 的复配凝胶初始弹性模量 E_0 值最大,这表明该质量浓度下凝胶硬度值最大,在压缩过程中弹性值较小,外力对凝胶内部结构的破坏作用较大;6 g/L 琼脂质量浓度下初始弹性模量 E_0 值最小,质地柔软;12 g/L 琼脂质量浓度下松弛时间 $\sum_1^3 \tau_i$ 最小,表明该浓度下应力松弛衰减速度最快。

3 结论

食物在压缩过程中的应力-应变关系与食物的质地和口感有关,当咀嚼进食时,人们会感觉到这种质地特性和口感,而口腔加工行为既取决于

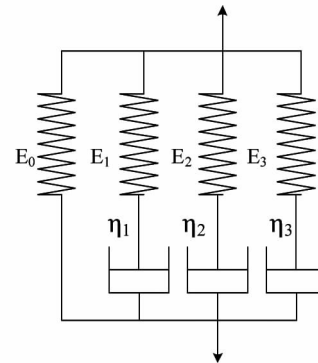


图 5 90 g/L 明胶-琼脂复配凝胶本构模型

Fig.5 90 g/L gelatin agar compound gel constitutive model

个体口腔加工能力也取决于食物的质构特性^[23]。食品凝胶的本构特质、凝胶机理、设计方法、结构和力学性能会影响流变学和摩擦学特性^[24-25],这在改变食品质量,提供感官感知的同时,对食品进行营养修饰方面具有重要意义。明胶和复配凝胶在不同复配浓度下压缩时,表现出不同的质构特性和断裂特性,其应力应变曲线显示,当提升样品的应变水平,明胶凝胶只有在高应变水平下才会发生断裂,而添加琼脂后的凝胶,随着质量浓度增加,低速低应变水平下更易破裂,碎片数量多。此外,试验所得质构特性参数结果表明:复配凝胶的硬度、弹性、咀嚼度随琼脂质量浓度的增加分别呈升高、降低、升高的趋势;口感、口腔加工崩解程度与应力应变水平和压缩速度相关,将质构特性与压缩试验参数相联系,结合所建立的本构模型,为

表6 不同琼脂质量浓度下凝胶本构模型参数

Table 6 Parameters of gel constitutive model under different agar mass concentrations

琼脂质量浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	6	12	24	48
E_0/Pa	1 257.1656	5 758.3028	10 224.6035	15 841.6433
E_1/Pa	35 888.2689	9 569.8893	26 141.5688	13 588.0056
$\eta_1/(\text{Pa}\cdot\text{s})\times 10^6$	4.5847	0.07100	2.0705	1.7597
τ_1/s	127.7500	7.4190	79.2020	129.5000
E_2/Pa	36 302.5792	9 857.8469	14 237.2473	27 554.2415
$\eta_2/(\text{Pa}\cdot\text{s})\times 10^6$	4.5986	12.2064	21.4635	0.4112
τ_2/s	126.6700	12.3800	1 507.5600	14.9200
E_3/Pa	10 505.7588	30 554.4093	25 691.5689	17 360.0643
$\eta_3/(\text{Pa}\cdot\text{s})\times 10^6$	52.3948	2.0342	0.3524	29.3995
τ_3/s	49.8700	6.6580	13.7160	1 693.5000
R^2	0.9895	0.9995	0.9993	0.9993

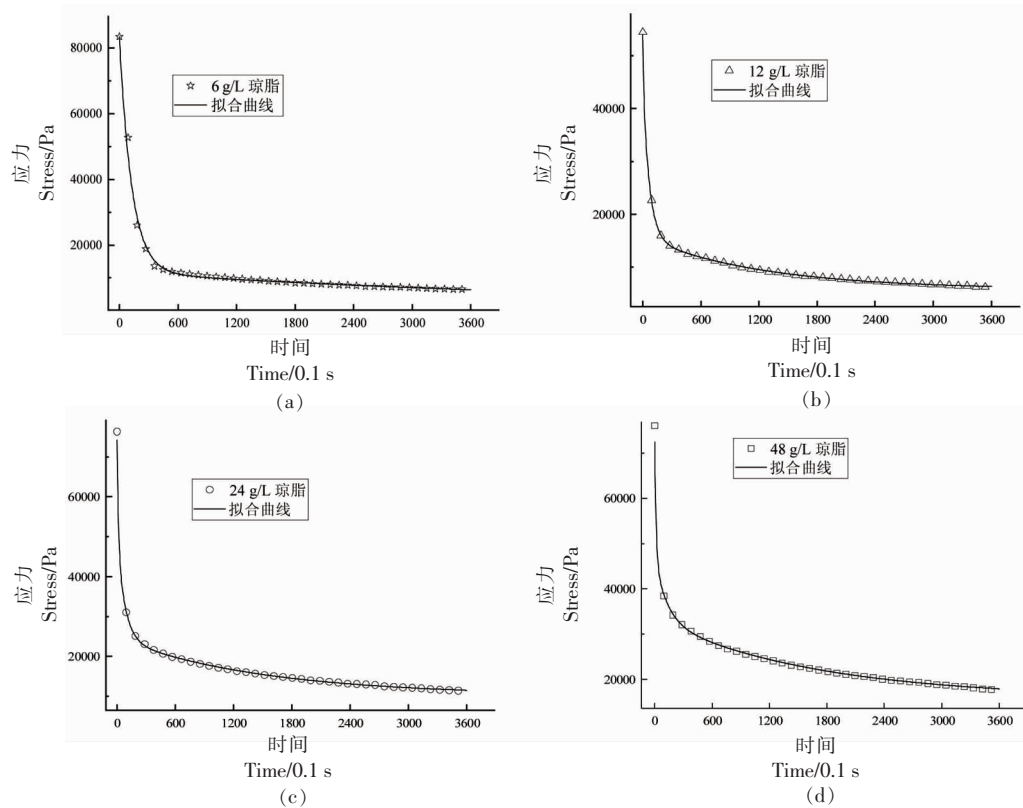


图6 不同琼脂浓度下凝胶应力拟合曲线图

Fig.6 Fitting curves of gel stress under different agar concentration

通过输入特定的力学性能参数来预测特定人群所需的口感特性,开发特定人群所需的食品提供模型参考。然而本文并未测试除凝胶之外的食品类型,无法确定所测的断裂特性和质构、崩解行为之间的关系能在多大程度上推广到其它食品类型。因此,拟在今后研究中多调查不同类型食物,寻求一种普遍关系的方法,适用于大范围的食物类型,

且通过这种方法,可调整力学性能参数与压缩速度来开发特定口感需求的食品。

参 考 文 献

- [1] SHIPRA T, RAMASAMY R, SUVENDU B. Dehumidifier assisted drying of a model fruit pulp - based

- gel and sensory attributes[J]. *Journal of Food Science*, 2012, 77(7): 263–273.
- [2] THOMAS A V. Gels: Model systems for soft matter food physics[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2015, 3: 71–84.
- [3] 徐晓飞, 陈少洁, 刘玮, 等. 不同来源明胶软糖质构的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2017(11): 107–112. XU X F, CHEN S J, LIU W, et al. Study on texture of gelatin soft sweets from different sources[J]. *China Food Additives*, 2017(11): 107–112.
- [4] SHIPRA S, SVENDU B. Strain and strain rate dependence of gellan, agar and agar–gellan gels as model systems [J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 141: 93–98.
- [5] JING G, WANG X Y, JASON C S, et al. Influence of bread structure on human oral processing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 167: 147–155.
- [6] 詹民民, 代欣, 俞经虎. 基于压缩速率的琼脂凝胶力学性能研究[J]. *制造业自动化*, 2018, 40(4): 73–76, 85. ZHAN M M, DAI X, YU J H. Study on mechanical properties of agar gel based on compression rate [J]. *Manufacturing Automation*, 2018, 40(4): 73–76, 85.
- [7] YU J H, SANTOS P H S, CAMPANELLA O H. A study to characterize the mechanical behavior of semisolid viscoelastic systems under compression chewing – case study of agar gel[J]. *Journal of Texture Studies*, 2012, 43(6): 459–467.
- [8] MARCO S, BETINA P F, ERIK V D L, et al. Mechanical properties affect detectability of perceived texture contrast in heterogeneous food gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 80: 254–263.
- [9] GUO Q, YE A Q, LAD M, et al. Disintegration kinetics of food gels during gastric digestion and its role on gastric emptying: An *in vitro* analysis[J]. *Food & Function*, 2015, 6(3): 756–764.
- [10] 李海燕. 琼脂/魔芋胶复配的理化性质及力学性能研究[J]. *现代食品*, 2020(5): 202–203, 213. LI H Y. Study on physicochemical properties and mechanical properties of agar / konjac gum[J]. *Modern Food*, 2020(5): 202–203, 213.
- [11] 王素娟. 食品胶体的凝胶机理及协同作用研究进展[J]. *产业与科技论坛*, 2018, 17(2): 59–60. WANG S J. Research progress on gel mechanism and synergistic effect of food colloid[J]. *Industry and Technology Forum*, 2018, 17(2): 59–60.
- [12] 侯团伟, 张虹, 毕艳兰, 等. 食品胶体的凝胶机理及协同作用研究进展[J]. *食品科学*, 2014, 35(23): 347–353. HOU T W, ZHANG H, BI Y L, et al. Research progress on gel mechanism and synergistic effect of food colloid[J]. *Food Science*, 2014, 35(23): 347–353.
- [13] PETERSEN P E, OGAWA H. Promoting oral health and quality of life of older people –the need for public health action[J]. *Oral Health Preventive Dentistry*, 2018, 16(2): 113–124.
- [14] MTHILDE V D, CLAIRE S R, CHANTAL S, et al. Using food comfortability to compare food’s sensory characteristics expectations of elderly people with or without oral health problems[J]. *Journal of Texture Studies*, 2017, 48(4): 280–287.
- [15] LAVERGNE M D D, VELDE F V D, BOEKEL M A J S V, et al. Dynamic texture perception and oral processing of semi–solid food gels: Part 2: Impact of breakdown behaviour on bolus properties and dynamic texture perception[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 49: 61–72.
- [16] 李晓锋. 六自由度仿生咀嚼机器人研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014. LI X F. Research on 6–DOF bionic chewing robot [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [17] 韩敬虎. 咀嚼吞咽一体化仿生机器人研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016. HANG J H. Research on integrated bionic robot for chewing and swallowing[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [18] SOUMYA B, SUVENDU B. Compressive textural attributes, opacity and syneresis of gels prepared from gellan, agar and their mixtures[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 102(3): 287–292.
- [19] 吴修东. 高热稳定性明胶软糖的开发和工艺优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2011. WU X D. Development and process optimization of high thermal stability gelatin jelly [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [20] MATSUO K, PALMER J B. Video fluoroscopic techniques for the study of oral food processing[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2016, 9: 1–10.
- [21] 段宇星, 杨强, 赵苗苗, 等. 弹性体材料应变率相关力学行为模型[J]. *橡胶工业*, 2020, 67(12):

- 899–903.
- DUAN Y X, YANG Q, ZHAO M M, et al. Strain rate dependent mechanical behavior model of elastic materials[J]. Rubber Industry, 2020, 67(12): 899–903.
- [22] 帅词俊, 段吉安, 王炯. 关于黏弹性材料的广义 Maxwell 模型[J]. 力学学报, 2006(4): 565–569.
- SHUAI C J, DUAN J A, WANG T. On the generalized Maxwell model of viscoelastic materials[J]. Journal of Applied Mechanics, 2006(4): 565–569.
- [23] EMMA M K, MARION M, HETHERINGTON S, et al. Oral processing of hydrogels: Influence of food material properties versus individuals' eating capability[J]. Journal of Texture Studies, 2020, 51(1): 144–153.
- [24] CAO Y P, RAFFAELE M. Design principles of food gels[J]. Nature Food, 2020, 1(2): 106–118.
- [25] 蔡慧芳, 陈建设. “口腔”摩擦学在食品质构感官研究中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(5): 1969–1975.
- CAI H F, CHEN J S. Application of "oral" tribology in sensory study of food texture[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2016, 7(5): 1969–1975.

Characteristics of Food Gel and Its Application in Oral Processing

Zhang Fennan¹, Yu Jinghu^{1,2*}

¹Academy of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu

²Jiangsu Key Laboratory of Food Advanced Manufacturing Equipment Technology, Wuxi 214122, Jiangsu)

Abstract In recent years, the lack of basic data on the correlation between food texture and oral processing ability, which restricts the development and manufacture of food with good taste and matching with the oral processing ability of the elderly population, has aroused people's interest in the research of soft materials, especially food gel breakage behavior. By analyzing the variation law of the complete stress–strain curve of the composite gel with different mass concentration, the relationship between fracture stress, fracture strain, young modulus and specific perceptible texture characteristics was explored, and a regression equation model between texture characteristics and compression parameters was established, and a chewing experiment based on the biomimetic mastication platform was carried out. The number of fragments and the maximum masticatory force after chewing were analyzed, and the viscoelastic constitutive model of the gel was established. The results showed that the fracture stress and fracture strain had great influence on the breakage behavior of food gel, and the gel with lower fracture stress and lower fracture strain value was more easily decomposed into a large number of debris, and the specific compression parameters had a significant effect on the gel texture parameters. These results are of great significance for developing gel food materials for the elderly.

Keywords food gel; constitutive model; mechanical properties; texture parameters; bionic chewing platform